WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

Занимательный компьютер

Клеточный автомат создает модель мира и мир вокруг себя

БРАЙАН ХЭЙЕС

Удивительно, что молекулы воды «знают», как создавать сложные симметричные снежинки. Никакой «архитектор» не руководит строительством, и молекулы не несут информации об этой кристаллической структуре. Весь узор возникает в результате ближних взаимодействий множества одинаковых частиц. Каждая молекула реагирует только на воздействие ближайших соседей, но расположение в определенном порядке сохраняется во всей структуре, состоящей примерно из 10^{20} молекул.

Чтобы лучше понять этот процесс, представим себе, что каждое место, где молекула может быть помещена (так называемый центр), управляется с помощью элементарного компьютера. По мере роста кристалла компьютер наблюдает за соседними центрами и, находя их, определяет по некоторому установленному правилу, должно ли быть занято его собственное место, или оно должно пустовать. Подобные вычисления проводятся для всех центров по одному и тому же правилу.

Вычислительная модель роста снежинки является клеточным, или ячеистым, автоматом — однородной схемой многих идентичных клеток, или ячеек, причем каждая клетка имеет несколько возможных состояний и взаимодействует лишь с несколькими соседними клетками. Компоненты системы — клетки, или ячейки, и правило вычисления следующего состояния клетки может быть простым, но тем не менее вызывает весьма сложную эволюцию.

Идея автомата с клеточной структурой почти так же стара, как и идея электронно-вычислительной машины. Первые исследования были проведены в начале 50-х годов Дж. фон Нейманом (следует учесть важный вклад в эти разработки С. Улама). Первоначальная цель фон Неймана состояла в создании простой системы, способной воспроизводить саму себя подобно живому организму. Наиболее известный клеточный автомат — игра «Жизнь», придуманная в 1970 г. Дж. Конвеем, как ясно из названия, также имеет биологический аспект: клетки рождаются, живут или умирают в зависимости от локальной плотности популяции.

В более поздних работах, посвященных клеточным автоматам, исследования приняли несколько другое направление. Конфигурации локально взаимодействующих клеток рассматриваются как потенциально важные модели физических систем — от снежинок до ферромагнетиков и Галактики. Они применимы также к вопросам кибернетики и вычислительной математики, как практическим (как следует организовать сеть взаимодействующих ЭВМ?), так и теоретическим (каков самый крайний предел мощности вычислительной машины?). Возможно, наиболее интригующим является тот факт, что клеточный автомат может рассматриваться как «числовая вселенная», которая сама по себе достойна исследования, даже если отвлечься от ее полезности как модели реального мира.

Возрождение интереса к клеточным автоматам было отмечено созданием рабочей группы по данной теме год назад в Лос-Аламосской национальной лаборатории. Был опубликован сборник работ (около 20 статей) в журнале «Physica D» и отдельным выпуском в издательстве «North-Holland». Почти все, что содержится в этом сборнике, основано на работах, обсуждавшихся на специальном симпозиуме в Лос-Аламосе.

Для характеристики клеточного автомата полезно выделить четыре его аспекта. Во-первых, расположение клеток образует некоторую геометрическую фигуру. Для модели роста снежинок достаточна двумерная шестиугольная схема, но в большинстве других случаев выбирается прямоугольная решетка, состоящая из квадратов. Легко можно построить трехмерную (и даже с бóльшим числом измерений) схему, но гораздо труднее ее себе представить. Недавно поразительные открытия были сделаны с простейшей одномерной схемой: простой цепочкой клеток.

Далее, при заданной схеме необходимо определить ту окрестность, которую данная клетка изучает при вычислении своего следующего состояния. В случае двумерных прямоугольных схем особое внимание уделяется окрестностям двух видов. Фон Нейман рассматривал четыре ближайших соседа каждой клетки: на севере, юге, востоке и западе; это множество клеток теперь называют окрестностью фон Неймана. Окрестность, включающую эти четыре соседние клетки и четыре клетки, прилегающие к исходной по диагоналям, называют окрестностью Мура (в честь Э. Мура). Ясно, что окрестности пересекаются и данная клетка входит сразу в несколько окрестностей. В некоторых случаях считают, что центральная клетка — та клетка, которая производит вычисления, — сама входит в свою окрестность.

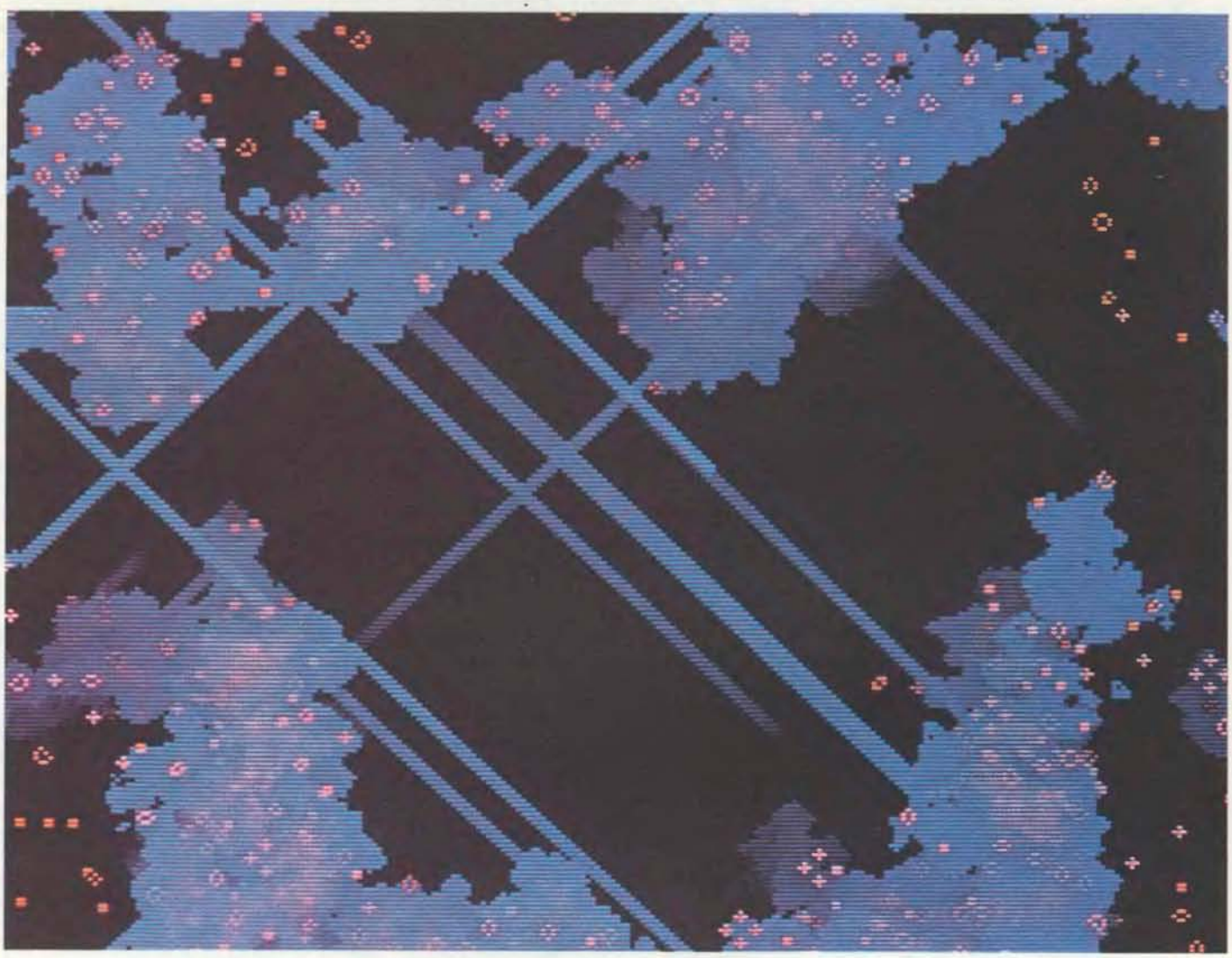
Третий фактор, который следует рассматривать при описании клеточного автомата, — это число состояний, которое может принимать клетка. Фон Нейман построил самовоспроизводящуюся систему, составленную из клеток с 29 возможными состояниями, однако большинство автоматов гораздо проще. Имеется огромный диапазон для изменений даже у двоичных автоматов, у которых клетка имеет два возможных состояния. Состояния могут быть представлены как 1 или 0 (включено или выключено, живое или мертвое).

Наконец, первоисточник изменений в мире клеточных автоматов — это огромное число возможных правил для определения будущего состояния клетки исходя из теперешней конфигурации ее соседей. Если k — число состояний, которые может принимать каждая клетка, а n — число клеток, входящих в окрестность, то существует k^{k^n} возможных правил. Так, для двоичного автомата с окрестностью фон Неймана (где $n = 4$) существует более чем 65 000 возможных правил; для окрестности Мура (где $n = 8$) имеется 10^{77} правил. Однако лишь малая часть их когда-либо изучалась.

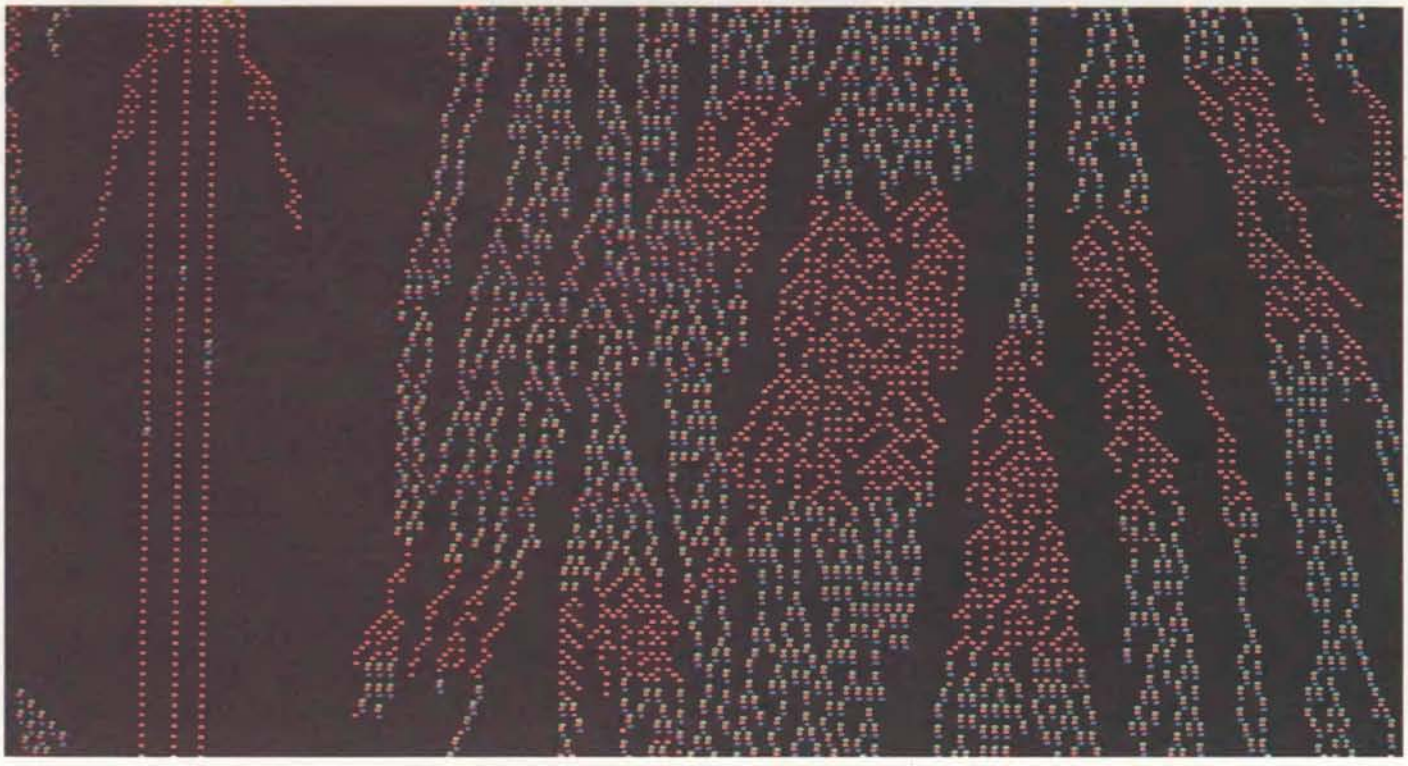
В ИГРУ «Жизнь» играют на прямоугольной решетке из клеток с двумя состояниями и с окрестностью Мура и дополнительным усложнением, согласно которому центральная клетка тоже считается членом своей окрестности. Другими словами, при каждом шаге эволюции системы каждая клетка проверяет состояния восьми своих соседей и свое собственное. Согласно правилам, установленным Конвеем, если центральная клетка жива, то она будет продолжать жить в следующем поколении, когда две или три клетки из ее окрестности живы. Если найдутся три живые клетки в рассматриваемой окрестности, то центральная клетка будет живой в следующем поколении независимо от ее теперешнего состояния. Во всех других случаях центральная клетка либо умирает, либо остается мертвой.

Прелесть игры «Жизнь» состоит в ее непредсказуемости. Некоторые схемы полностью умирают; многие другие образуют устойчивые конфигурации либо циклические конфигурации с периодом в несколько поколений. Однако за прошедшие годы было найдено много

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU



Игра «Жизнь», развивающаяся на экране машины, созданной Тоффоли и имитирующей клеточный автомат



Узор дендритов, созданный клеточным автоматом с асимметричным правилом перехода

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

очень интересных начальных состояний, таких, как «скользящая пушка», которая порождает нескончаемый поток снарядов. Исслсдование игры «Жизнь» в настоящее время продолжается. Последние достижения были описаны Мартином Гарднером в книге «Wheels, Life, and Other Mathematical Amusements». Здесь же я рассмотрю другие клеточные автоматы, свойства которых только начинают исследовать.

Среди множества возможных правил перехода лишь немногие интересны сами по себе. Например, правило, устанавливающее, что данная клетка будет «включена» тогда и только тогда, когда клетка слева от нее включена, определяет эволюцию, которую очень легко предсказать: любая начальная схема сохраняет свою конфигурацию, но сдвигается на одну клетку вправо на каждом временно́м шаге. Подкласс правил, называемых счетными, или суммирующими, по-видимому, содержит образцы почти всех встречающихся типов клеточных автоматов. При правилах такого рода новое состояние клетки зависит только от числа соседей в данном состоянии, но не от их положения. Многие автоматы, основанные на таких правилах, были изучены членами группы информационной механики лаборатории вычислительной математики в Массачусетском технологическом институте. В эту группу входят Э. Фредкин, Н. Марголус, Т. Тоффоли и Дж. Вишняк.

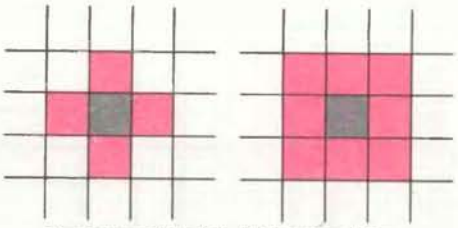
Одно из простейших счетных правил — это правило четности, которое приписывает клетке значение 1, если нечетное число соседей находится в состоянии 1, и значение 0 в других случаях. Пространственная эволюция этой системы с применением этого правила в окрестности фон Неймана была описана в октябрьском номере нашего журнала*. Любая начальная конфигурация повторяется четыре раза, затем эти четыре копии в свою очередь повторяются и т.д.

* См.: В мире науки, 1983, №12, с. 103-109. — *Прим. ред.*

Другой класс счетных правил — это правила «голосования», при которых центральной клетке приписывается значение 1, как только число единиц в ее окрестности превышает некоторое пороговое значение. В докладе на Лос-Аламосском симпозиуме Вишняк отметил, что по правилам такого типа получаются модели фильтрации (просачивания) и образования активных центров — очень важных явлений в физике твердого тела и других областях науки. Термином «фильтрация» обозначают образование непрерывного пути через некоторое пространство; например, когда металл распределен в изолирующей матрице, проводимость материала зависит от вероятности образования непрерывной цепочки атомов металла. Точно так же передача инфекционного заболевания возможна только при наличии непрерывающейся последовательности восприимчивых индивидов. Образование активных центров — процесс, на котором основаны рост кристаллов, кипение жидкости и другие подобные явления.

Одно из правил перехода, приводящее к фильтрации, присваивает центральной клетке значение 1 только тогда, когда значения по меньшей мере трех клеток из пяти — т.е. окрестности фон Неймана плюс центральная клетка — равны 1. Развитие фильтрации очень сильно зависит от исходной концентрации единиц. Если концентрация меньше половины, то непрерывная цепочка единиц, заполняющих схему, по-видимому, не образуется в ходе эволюции. При концентрации 1/2 и больше появляются цепочки, но вся решетка ими не заполняется; в заключительном устойчивом состоянии остаются «островки» нулей. Образование кристаллов, при котором схема прочно заполняется единицами, наблюдается в том случае, когда правило изменяется и требуются лишь две из пяти единиц в окрестности. Критическая концентрация равна 0,0822.

МОДЕЛЬ Изинга, одно из средств теоретического аппарата физики, при поверхностном рассмотрении кажется очень похожей на клеточный автомат.

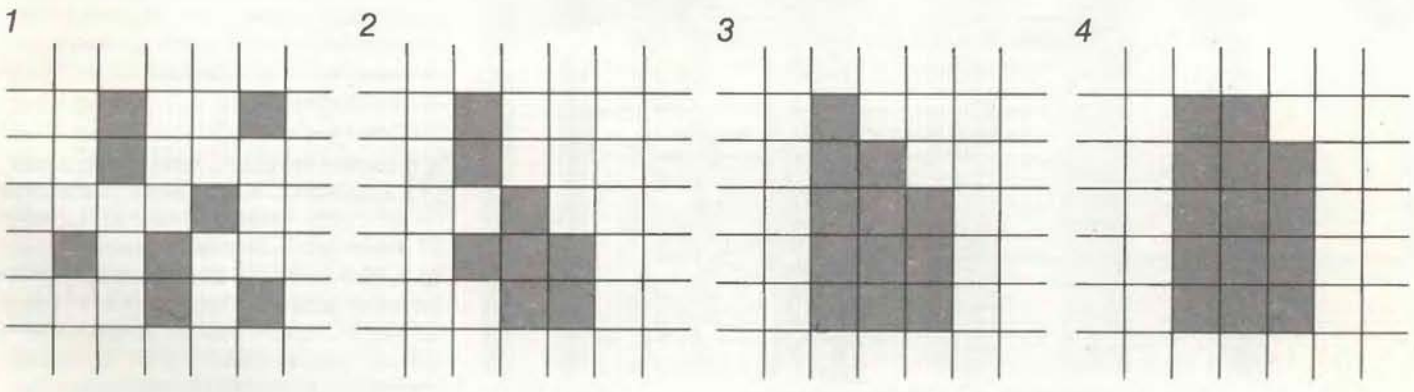


Окрестности фон Неймана и Мура

Модель представляет собой прямоугольную решетку, в которой каждый центр имеет два возможных значения и взаимодействует лишь с четырьмя своими ближайшими соседями. Эта модель часто используется для описания ферромагнетиков: каждый центр представляет собой атомный спин, который может быть направлен либо вверх, либо вниз. Если температура ниже критической (температуры Кюри), спины стремятся ориентироваться одинаково и материал намагничивается, но при более высоких температурах их направления распределены более или менее случайным образом.

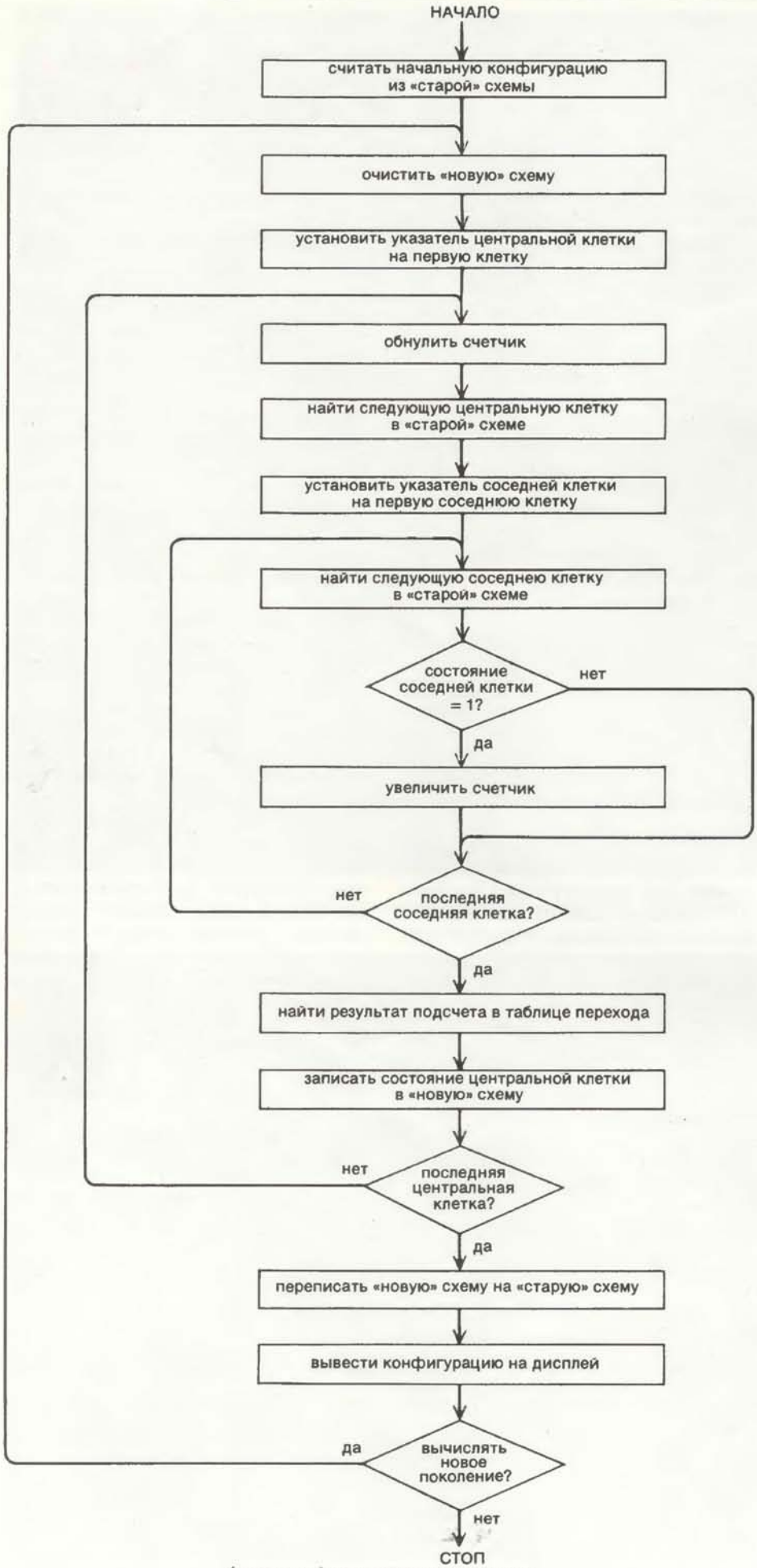
В октябрьском номере журнала я рассматривал вариант модели Изинга, созданный с помощью КЭБ-программ. Клеточная структура этой модели располагает к использованию методов клеточных автоматов при ее изучении. Я заметил любопытное явление: при низкой температуре спины направлены неодинаково, они располагаются в шахматном порядке, при котором направления «вверх» и «вниз» чередуются. При каждом временно́м шаге все спины меняют свое направление. В ферромагнетиках шахматная структура является конфигурацией с высшей энергией и поэтому должна быть неустойчивой; эта структура характерна для антиферромагнетиков.

Вишняк обнаружил эту проблему и объяснил ее. В стандартном варианте модели Изинга при каждой итерации может изменяться только один спин. Следовательно, когда некоторый конкретный центр наблюдает за своими соседями, то одни из наблюдаемых спинов являются «старыми», а другие «новыми». При этих условиях «осциллирующий» антиферромагнетик не может возникнуть. Только когда все



Эволюция клеточного автомата при правиле голосования «два из пяти»

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU



Алгоритм для клеточного автомата, основанный на счетном, или суммирующем, правиле перехода

спины одновременно «производят свои вычисления», возникают благоприятные условия для антиферромагнетика высокой энергии. Существует возможность избежать этой «катастрофы обратной связи», однако более важный вывод состоит в том, что интуитивное соответствие между моделью Изинга и клеточным автоматом обманчиво.

Вишняк и другие ученые из группы Массачусетского технологического института подчеркивают, что клеточный автомат имеет статус, отличный от статуса других физических моделей. Наиболее распространенным средством построения математической модели мира издавна служило дифференциальное уравнение, которое описывает изменения некоторой величины как функцию координат и времени. Например, уравнения Максвелла дают изменения электромагнитного поля от точки к точке и от одного момента времени к другому. Все величины в таких уравнениях являются непрерывными (они гладко изменяются), с другой стороны, клеточный автомат — полностью дискретная система. Пространством является не континуум, а клеточная схема; время разбивается на последовательность дискретных шагов, а клетки автомата могут иметь лишь конечное число состояний, в то время как величина поля принимает значения из непрерывной области значений.

Разумеется, реальные пространство и время и многие физические переменные величины рассматриаются как непрерывные, а не дискретные (по крайней мере, в наиболее распространенных областях исследований). Однако из этого не следует, что дифференциальные уравнения по своей природе позволяют построить более совершенную модель реального мира. Когда уравнения должны быть решены численно, как при моделировании с помощью ЭВМ, непрерывные переменные могут быть вычислены приблизительно с некоторой конечной точностью; на самом деле они представляются дискретными величинами. При использовании клеточных автоматов дискретность выступает в явном виде, и их временная эволюция может быть вычислена точно; здесь приближения не нужны. Кроме того, в этом случае можно в большей степени использовать возможности цифровых вычислительных машин.

МОЖНО написать программу моделирования клеточного автомата даже для самого миниатюрного компьютера. Действительно, П. Бак из Брукхейвенской национальной лаборатории недавно утверждал в журнале «Physics Today», что моделирование в физике можно эффективнее и дешевле производить на небольшом персональном компьютере, а не на более мощных

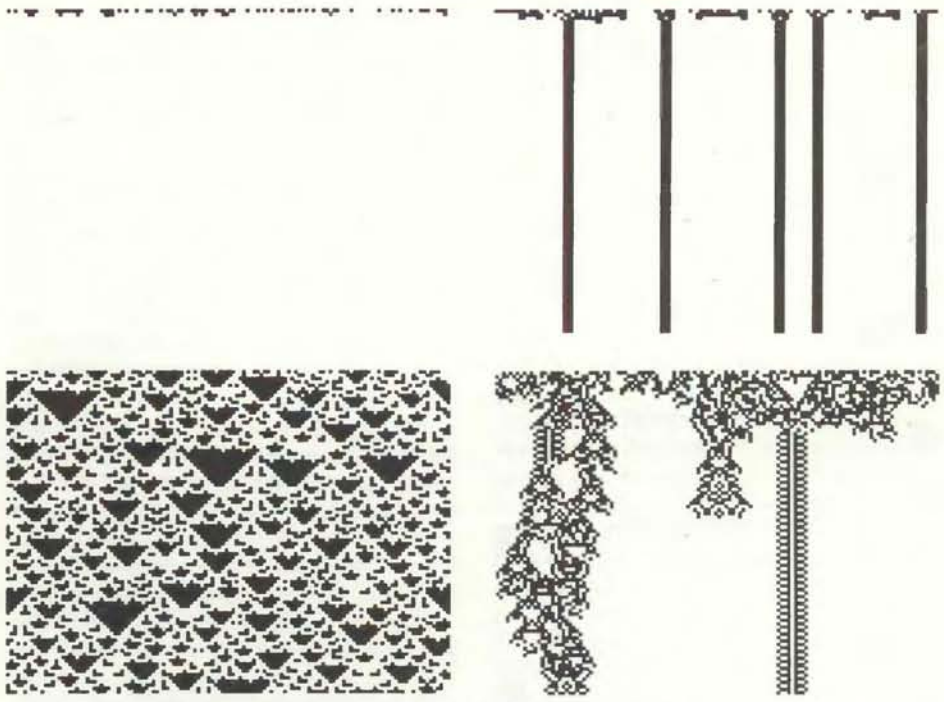
WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

вычислительных машинах общего пользования. Для иллюстрации этого он выбрал пример трехмерной модели Изинга на Commodore VIC-20 — компьютере стоимостью 4 доллара.

Наиболее прямолинейная программа клеточного автомата просто является воплощением метода, который каждый бы применял при выполнении процедуры ручным способом на листе бумаги в клетку. Сначала строится клеточная схема, в которой каждая клетка представлена ячейкой памяти в компьютере. При каждом временно́м шаге программа должна обращаться к каждой клетке по очереди, изучать ее окрестность и вычислять следующее состояние клетки. Само вычисление легко выполняется с помощью поиска значения в таблице. Если рассматриваются только счетные правила, таблице нужен всего один элемент для каждого возможного числа «активных» клеток. Когда допускаются правила другого рода, таблица может стать очень сложной.

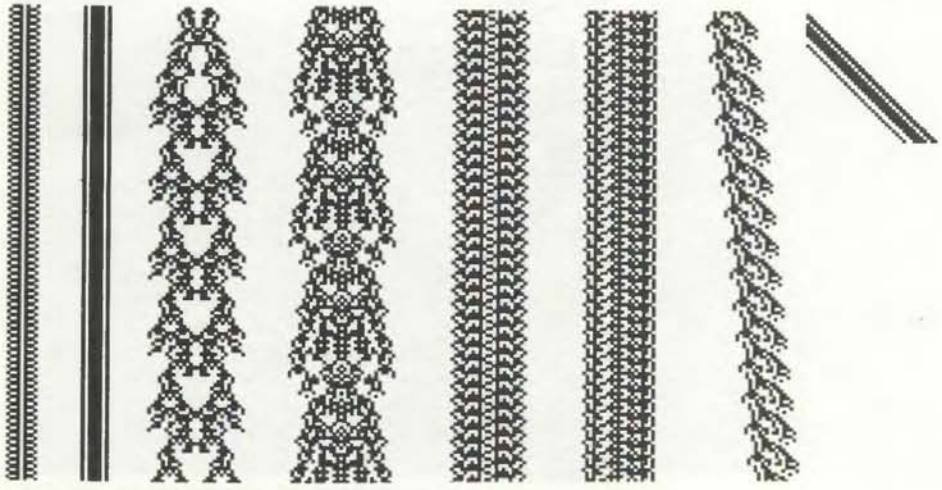
При написании такой программы следует иметь в виду несколько тонких моментов. Очень важно не нарушить состояния клетки, пока оно не проверено всеми другими клетками, в окрестность которых она входит. Простейший путь выполнения этого требования — сохранение двух копий данной схемы; программа изучает одну копию для определения текущего состояния окрестности и вносит результаты вычислений в другую копию. Следует также определить условия на границе. Идеальным случаем была бы бесконечная схема, но ясно, что это невыполнимо. Распространенным приемом является соединение концов схемы, так что клетки на противоположных краях становятся соседними. В одномерном случае схема такого рода топологически является окружностью, а в двумерном — тором, хотя это и конечные схемы, но границ они не имеют.

Программа описанного выше типа, выполняемая на универсальной ЭВМ, является последовательностной процедурой, которая моделирует действия схемы из многих компьютеров, работающих одновременно. Лучше было бы построить настоящую сеть многих компьютеров со структурой клеточного автомата. Конечно, не может быть и вопроса о построении такой машины (индивидуальные компьютеры должны быть довольно простыми и построены в большинстве случаев на одном полупроводниковом кристалле). Тот факт, что только близко расположенные компьютеры должны взаимодействовать между собой, также должен был бы уменьшить сложность всего устройства. По оценке Тоффоли, процессор должен был бы работать быстрее, чем ЭВМ общего назначения в миллион или даже миллиард раз.



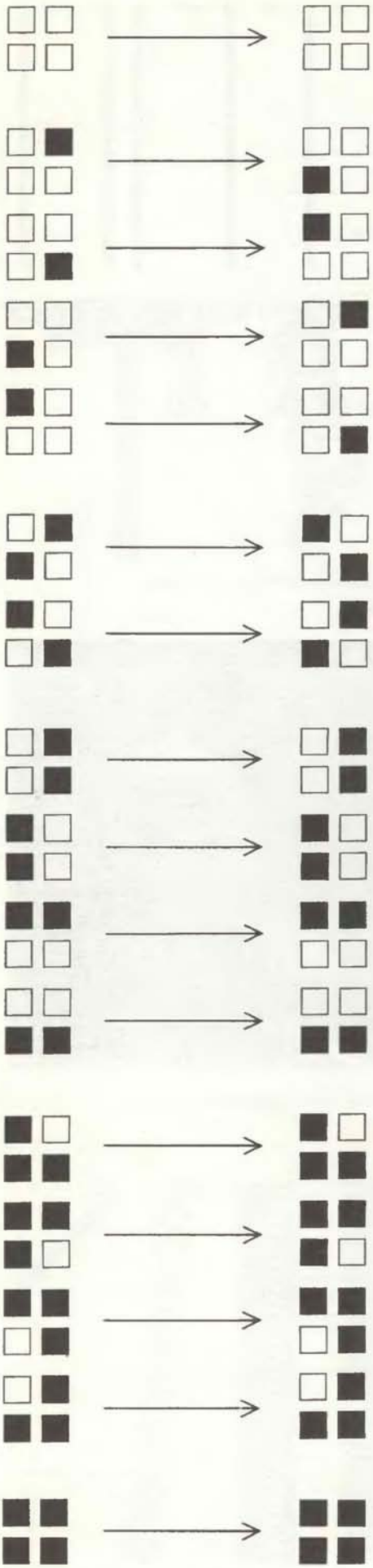
Четыре класса суммирующих правил в одномерном случае

Последовательные состояния одномерного автомата из класса 4



Некоторые компоненты возможной универсальной вычислительной машины

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU



Правило перехода для компьютера «на бильярдных шарах»

Предварительные разработки для компьютеров подобного рода производятся в Калифорнийском технологическом институте и Thinking Machines Corporation of Waltham (шт. Массачусетс).

Вместо того чтобы использовать кристаллы специального назначения, Тоффоли построил машину, имитирующую клеточный автомат, из стандартных компонентов микроэлектроники. Вычисления производятся последовательно, а не для всех клеток сразу, но, поскольку весь аппарат приспособлен к единственному виду вычислений, его быстродействие оказывается в 1000 раз больше, чем у универсальной ЭВМ. Сама машина представляет собой набор печатных плат, смонтированных в корпусе; она соединена с цветным дисплеем и управляется другим миниатюрным компьютером — Atari-800.

Машина Тоффоли, имитирующая клеточный автомат, имеет схему из 256 × 256 клеток, каждая из которых может принимать до 256 состояний. Состояние каждой клетки перевычисляется 60 раз в секунду. За счет высокой скорости изменения состояния такой системы вместо последовательности неподвижных фотографий мы видим фильм. Игра «Жизнь» больше не представляется как величественная прогрессия абстрактных узоров; она теперь больше походит на картину, наблюдаемую под микроскопом при изучении поведения бактерий или простейших организмов, плавающих, вращающихся, размножающихся, пожирающих и пожираемых друг другом.

Для одномерного клеточного автомата нужны менее мощные вычислительные средства (как в смысле объема памяти, так и в смысле быстродействия), чем для двумерного. Для одномерной системы легче написать программу. Линейная схема имеет еще одно преимущество над схемой на плоскости: более простая геометрическая структура позволяет легче аналитически понять эволюцию автомата. С. Вольфрам из Института высших исследований посвятил этому вопросу два года работы.

Единственное поколение одномерной схемы — просто ряд клеток, но последовательные поколения должны быть нанесены одно вслед за другим. Таким образом строится двумерная схема, имеющая одну пространственную и одну временну́ю оси, и всю эволюцию системы можно окинуть одним взглядом.

Вольфрам обнаружил, что все правила перехода, которые он исследовал до сих пор, можно разбить на четыре класса. Класс 1 состоит из тех правил, при которых эволюция приводит к устойчивому и однородному состоянию; например, все клетки принимают значения либо 1, либо 0. Класс 2 приводит к простым структурам, которые устойчивы или периодичны, но в любом случае остаются изолированными друг от друга. Правила класса 3 создают хаотические узоры, хотя и не обязательно случайные. В классе 4 собрано несколько правил перехода, которые порождают структуры существенной пространственной и временно́й сложности.

Вольфрам предположил, что одномерный клеточный автомат может быть простейшей правильно определенной системой, способной на сложное самоорганизующееся поведение. В природе многие непрерывные динамические системы имеют такую способность: начиная со случайного начального состояния они эволюционируют в высокоорганизованную структуру. (Примером служит снежинка). Эта эволюция может быть описана в терминах аттракторов, которые, по-видимому, притягивают систему к некоторому подмножеству всех возможных конфигураций.

Была проведена параллель между классами клеточных автоматов и некоторыми типами аттракторов, наблюдаемых в физических системах. Автоматы класса 1 аналогичны непрерывной системе с простейшим аттрактором — предельной точкой, которая неизменно приводит систему к одному и тому же заключительному состоянию. Эволюция автомата из класса 2 более похожа на эволюцию системы с предельным циклом, которая представляет собой последовательность бесконечно повторяющихся конфигураций.

Автоматы из класса 3 с их хаотическими узорами можно сопоставить с более интересными объектами, называемыми странными аттракторами, которые присущи таким физическим явлениям, как возникновение турбулентного течения. В системе, управляемой странным аттрактором, эволюция стремится к некоторому подмножеству всех возможных конфигураций, однако это подмножество может иметь крайне сложную структуру. Когда это множество представляется как массив точек в пространстве, она во многих случаях является фракталью, геометрической фигурой с дробным числом измерений.

Различие между классами автоматов можно выяснить, рассмотрев простой эксперимент. Предположим, что клеточный автомат начал свою эволюцию с какой-то случайно выбранной начальной конфигурации и делает несколько временных шагов; затем отмечается заключительное состояние. Теперь вернемся к исходному состоянию, изменим значение единственной клетки и дадим системе возможность проделать такое же число временных шагов. Какой эффект окажет это небольшое

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

изменение на заключительное состояние? У автоматов класса 1 никакого изменения не произойдет: система из класса 1 приходит в одно и то же заключительное состояние из любого начального состояния. У автоматов класса 2 может наблюдаться некоторый эффект, но он ограничен небольшой областью вблизи измененной клетки. В системе класса 3, изменив единственную клетку, можно вызвать такое нарушение, которое распространится на всю схему.

Правила класса 4 очень редко встречаются и являются самыми сложными. Некоторые совсем простые функции перехода попадают в этот класс; например, в окрестности, включающей центральную клетку и по две клетки с каждой стороны от нее, правило, устанавливающее, что значение центральной клетки равно 1, если две или четыре клетки равны 1, попадает в класс 4. Чувствительность к малым изменениям в начальном состоянии в классе 4 даже больше, чем в классе 3. Было выдвинуто предположение, что для предсказания будущего состояния автомата класса 4 не может быть более эффективной процедуры, чем разрешить автомату самому вычислить это состояние.

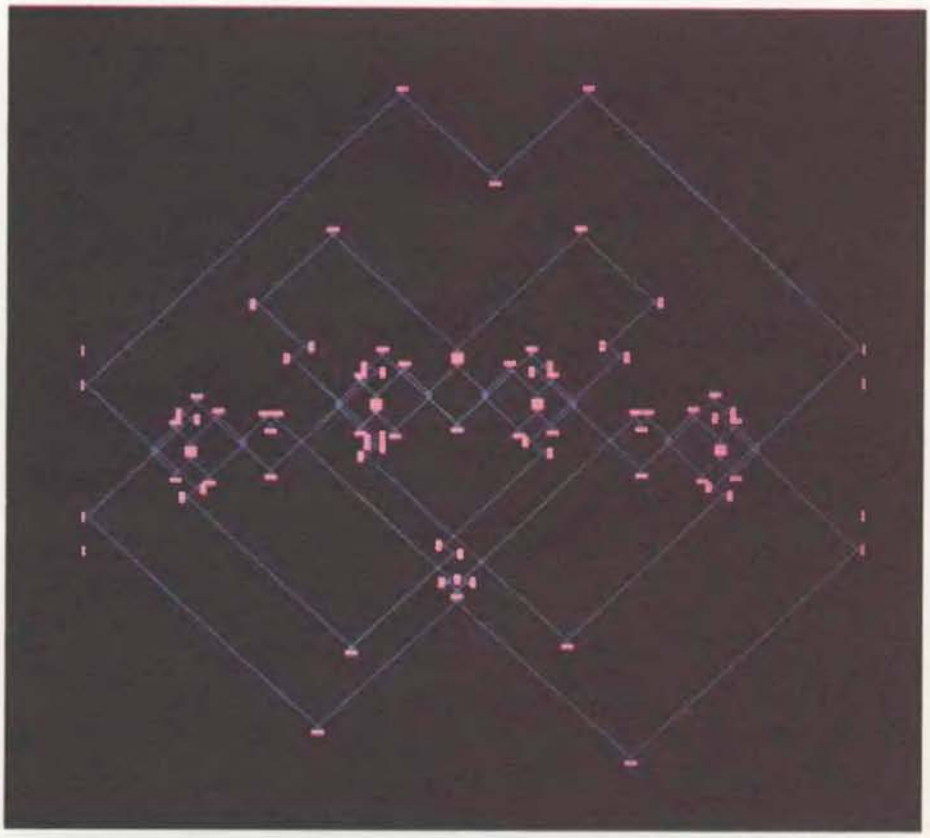
Это предположение можно интерпретировать более широко, а именно что автоматы класса 4 можно квалифицировать как универсальные вычислительные машины. Машина Тьюринга — наиболее известное устройство подобного рода: если некоторая функция может быть вообще вычислена, предполагается, что это может сделать машина Тьюринга. Можно доказать, что другие вычислительные машины тоже универсальны, если они эквивалентны машине Тьюринга. Было показано, что некоторые двумерные клеточные автоматы (включая игру «Жизнь») являются универсальными вычислительными машинами, и было также дано доказательство для сложных одномерных систем, в которых каждая клетка имеет 18 возможных состояний. Автоматы класса 4 были бы самой простой известной универсальной вычислительной машиной. Установлено, что они имеют большинство основных компонент. Не хватает лишь одного элемента — счетчика: устройства, выдающего последовательность импульсов через регулярные интервалы, подобно «скользящей пушке» в игре «Жизнь».

Аналогия клеточных автоматов с вычислительными машинами наводит на мысль, что их самоорганизующееся поведение может быть описано в терминах их вычислительных характеристик. Так, например, множество конфигураций, порожденных эволюцией клеточного автомата, можно представить как некий формальный язык. Каждая конфигурация рассматривается как слово языка, образованного в соответствии с множеством грамматических правил из последовательности символов, представляющих значения клеток автомата. Вольфрам показал, что конфигурация, порожденная любым клеточным автоматом за конечное время, может быть описана простым классом формальных языков, известных под названием регулярных. Для любого из этих регулярных языков можно найти простейшую грамматику. Такая грамматика дает простейшее описание конфигураций клеточного автомата и ее емкость можно принять за меру сложности конфигураций. Для клеточных автоматов классов 1 и 2 сложность стремится к конечному пределу за длительный период времени, так что структуры, порожденные этой системой, описываются регулярными языками. Однако для клеточных автоматов классов 3 и 4, по-видимому, требуются более сложные формальные языки.

СУЩЕСТВУЕТ особый класс клеточных автоматов, называемых обратимыми. Из любого начального состояния на любое число временных шагов допускается эволюция обратимого автомата, а затем автомат останавливается и запускается обратным ходом, после чего он возвращается в свое точное начальное состояние. Конфигурации, образованные типичным обратимым автоматом, качественно отличны от конфигураций, свойственных необратимому автомату. В частности, если конфигурация вначале случайна, то она и стремится остаться случайной — самоорганизующейся структуры не возникает.

Необходимым условием обратимости является детерминированность правила перехода в обоих направлениях, вперед и назад, т.е. каждое возможное состояние окрестности должно иметь единственное предыдущее состояние и единственное последующее состояние. Игра «Жизнь» необратима, потому что предыдущий этап какого-нибудь состояния нельзя определить однозначно; например, если текущее состояние клетки — «мертва», в предыдущем поколении она могла иметь любое число «живых» соседей, отличное от трех. Систематический способ создания обратимых правил перехода был изобретен Фредкином, а позднее исследован Марголусом. Суть этого метода — заставить следующее состояние клетки зависеть от двух предыдущих состояний окрестности. Состояние в момент $t + 1$ дается некоторой функцией окрестности в момент t минус та же функция в момент $t - 1$. Тогда обращение производится непосредственно: состояние в момент $t - 1$ должно даваться состоянием в момент t минус состояние в момент $t + 1$.

Из-за требования детерминизма в двух направлениях в эволюции обратимого автомата не должны встречаться аттракторы. Присутствие аттрактора ведет к тому, что в ходе эволюции многие начальные состояния развиваются



Компьютер «на бильярдных шарах» в действии

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NARODU.RU

такими путями, которые сливаются друг с другом; в обратной эволюции точки слияния стали бы точками ветвления, в которых нарушалось бы требование детерминизма. Точно так же обратимый клеточный автомат в своей эволюции не может образовать петли или выйти из нее, т.е. не может иметь циклических состояний, потому что снова возникает точка ветвления в том или ином направлении. Поскольку аттракторы и соответствующие им самоорганизующиеся конфигурации исключаются, может показаться, что обратимые правила перехода приводят к очень «скучным» клеточным автоматам, однако это компенсируется другими интересными особенностями таких систем. Самое замечательное — это то, что информация, заключающаяся в клеточной конфигурации обратимого автомата, оказывается сохраняемой величиной (т.е. не возрастающей и не убывающей в ходе эволюции автомата). Это свойство делает обратимые системы ценными моделями вычислений.

Марголус построил компьютер, имитирующий клеточный автомат, основанный на воображаемой механической системе, ранее исследованной Фредкином, — модель вычисления на основе бильярдных шаров. В этой модели биты информации (1 или 0) несут идеальные бильярдные шары, которые движутся без трения и отскакивают один от другого и от других препятствий идеально упруго. Наличие шара в указанном положении означает двоичную 1, а его отсутствие — двоичный 0. Умелым расположением бортов можно создать различные логические вентили, подобные тем, которые имеются в электронно-вычислительной машине. Например, в схеме «И» один бильярдный шар проходит через выходную область (и тем самым регистрируется двоичная 1), если только два шара приближаются к вентилю одновременно вдоль специфических траекторий.

Вариант такой модели клеточного автомата, построенный Марголусом, основан на простом и в некотором смысле необычном обратимом правиле перехода. Клетки рассматриваются не по отдельности, а блоками по 4; любая возможная конфигурация в пределах блока преобразуется в единственную производную конфигурацию. Правило составлено так, что одна единица на фоне остальных нулей распространяется в одном из четырех диагональных направлений решетки со скоростью 1 клетка за временной шаг; изолированная единица является воплощением бильярдного шара. «Монолитный» блок, состоящий из четырех единиц, неопределенно долго остается неизменным и действует как абсолютный отражатель. Когда моделирование производится на машине Тоффоли, имитирующей клеточный автомат, то «бильярдные шары» мечутся по экрану дисплея, образуя сложные пересекающиеся траектории. Наблюдая это упорядоченное (пусть даже безумное) движение, трудно помнить о том, что в программе не содержатся представления траекторий шаров, а просто применяется одно-единственное правило ко всем клеткам.

Модель на основе бильярдных шаров и ее воплощение в виде клеточного автомата тесно связаны с теорией вычислений. Было выдвинуто предположение, что любая вычислительная машина должна иметь компоненты, которые рассеивают энергию и информацию; в соответствии с этой теорией должен существовать «термодинамический предел» эффективности компьютера точно так же, как существует предел к.п.д. теплового двигателя. Неизбежные, по предположению, потери информации и энергии являются прямым следствием необратимости вычислительного процесса. (Когда компьютер складывает 5 и 3, чтобы получить результат 8, процесс не может быть обращен, потому что существует бесконечно много чисел, которые при сложении дают тот же результат.)

Фредкин, Тоффоли и Марголус подчеркивают, что модель на основе бильярдных шаров противоречит понятию неизбежного рассеяния. Действительно, бильярдные шары не могут сами себя создавать или разрушать, и вся информация, определяющая их начальную конфигурацию, сохраняется в ходе эволюции системы. Входы операции сложения могут быть легко восстановлены обращением траекторий. В принципе вычислительная машина, построенная на основе бильярдных шаров, могла бы действовать без внутренних затрат энергии.

С особой ясностью связь между физическими процессами и вычислениями была установлена Тоффоли в его заявлении, которое можно интерпретировать как описание самого большого из всех клеточных автоматов. «В некотором смысле, — пишет он, — в течение миллиардов лет природа постоянно вычисляла «следующее состояние» Вселенной; все, что нам надо сделать, — и действительно, что мы *можем* сделать, — это «войти в колею» этого гигантского непрекращающегося процесса вычисления и попытаться угадать, какая часть его движется в нужном нам направлении».

Издательство **МИР** *предлагает:*

М. Новради
СТЕРЕОХИМИЯ
Перевод с английского

Книга состоит из трех глав, посвященных соответственно статической, динамической и прикладной стереохимии. В гл. 1 рассматривается строение стереоизомерных органических и элементоорганических соединений на основе принципов молекулярной симметрии и хиральности. В гл. 2 на большом числе примеров разбираются основные закономерности динамической стереохимии. В гл. 3 рассматриваются различные практические приложения принципов стереоселективности и стереоконтроля для понимания разнообразных химических превращений.

Книга полезна для самых разных категорий читателей. Студенты химических специальностей найдут для себя в ней новые теоретические подходы и новые примеры из области практической стереохимии, дополняющие основной курс преподавания этой науки. Научные сотрудники всех химических профилей смогут с ее помощью существенно повысить свою теоретическую подготовку и создать полное представление о реальных возможностях стереохимических подходов и методов для решения целого ряда актуальных научных задач. Специалисты по физическим методам исследования смогут по этой книге ознакомиться со многими актуальными научными направлениями, в развитие которых важный вклад может внести использование современных приборов и новых методик эксперимента. И наконец, научные сотрудники, для которых стереохимия является основной специальностью, смогут воспользоваться этой книгой как удобным современным справочником, содержащим интереснейшие сведения из ряда зарубежных обзоров, монографий и периодических изданий.

1984, 22 л. Цена 3 р. 60 к.